

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra Elektroenergetiky

Diagnostika
transformátorů VVN

UHV
transformers diagnostics

Zadání bakalářské práce

Student:

Jaroslav Poříz

Studijní program:

B2649 Elektrotechnika

Studijní obor:

3907R001 Elektroenergetika

Téma:

Diagnostika transformátorů VVn
UHV transformers diagnostics

Zásady pro vypracování:

Technická diagnostika, řazení, aktuální stav, normy, provozní předpisy a legislativa, trendy vývoje.

Metody testovací, provozní a on-line diagnostiky VVn transformátorů.

Diskuse závěrů a zhodnocení naměřených hodnot či výsledků diagnostiky pro konkrétní transformátory a vybrané diagnostické metody.

Seznam doporučené odborné literatury:

Dle pokynů vedoucího práce

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Bernat, Ph.D.**

Datum zadání: 20.11.2009

Datum odevzdání: 07.05.2010

prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Vondrák, CSc.
děkan fakulty

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

Velice děkuji svému vedoucímu práce panu Ing. Petru Bernatovi, Ph.D. za pomoc při zpracování této práce.

A handwritten signature in blue ink, reading "Jaroslav Poříz". The signature is written in a cursive, flowing style.

Jaroslav Poříz, 4.4.2010

Abstrakt

V této práci jsem porovnal teoretické i praktické výsledky z diagnostiky transformátorů VVn, která jsem získal studiem na vysoké škole i v praxi u mého zaměstnavatele. Pro porovnání výsledků měření jsem použil několik praktických měření z diagnostiky transformátorů VVn jmenovitých výkonů 40MVA a 25MVA, výrobců Škoda, EBG a Končar. V první části bakalářské práce se nachází obecný teoretický rozbor o problematice diagnostiky, popis jednotlivých metod a způsobů měření. Krátce popisuji směr a trendy vývoje diagnostiky těchto netočivých strojů. V další části porovnávám naměřené veličiny u strojů různých výrobců a údaje získané měřením. Jako podklad pro porovnání mi také posloužila databáze naměřených hodnot transformátorů z období let 2006 – 2010, na které jsem se podílel s kolegy svého zaměstnavatele.

Abstract

In this work, I compared the theoretical and practical results of diagnostic transformers UHV, which I obtained university studies and practice with my employer. For comparison of results, I used some practical measurements of diagnostic EHV transformers rated 40MVA and 25MVA power, manufacturers Škoda, EBG and Končar. In the first part of this work is a general theoretical analysis of the issues of diagnosis, description of methods and systems of measurement. Briefly describe the direction and trends in diagnosis of non-rotating machines. In the next section I compare the measured values of the various manufacturers of machines and data measurements. As a basis for comparison I also served a database of measured values of transformers from the period 2006 - 2010, in which I participated with colleagues of his employer.

Klíčová slova

Transformátor VVn, převod transformátoru, diagnostika, ztrátový činitel, izolační odpor, polarizační index, odpor vinutí, kapacita průchodky VVn transformátoru, frekvenční charakteristika, obsah vody ve vinutí.

Keywords

UHV transformer, transformer ratio, diagnostics, leakage factor, insulation resistance, polarization index, the resistance of the windings, bushings UHV transformer capacity, frequency response, the water content in the windings.

Seznam použitých symbolů a zkratk

U_n	[V]	jmenovité napětí
U_1	[V]	napětí na straně vinutí VVn
U_2	[V]	napětí na straně vinutí Vn
I_0	[A]	efektivní hodnota proudu naprázdno
f	[Hz]	frekvence
R_{AB}	[Ω]	elektrický odpor mezi vinutím A a B
R_{AC}	[Ω]	elektrický odpor mezi vinutím A a C
R_{BC}	[Ω]	elektrický odpor mezi vinutím B a C
R_f	[Ω]	elektrický odpor jedné fáze
R_s	[Ω]	střední hodnota odporu jedné fáze
T_x	[°C]	teplota vinutí transformátoru
R_o	[Ω]	odpor vinutí při známé teplotě
R_x	[Ω]	odpor vinutí změřený při neznámé teplotě
t_o	[°C]	známá teplota (údaj výrobce)
p	[-]	převod transformátoru
$tg\delta$	[%]	ztrátový činitel]
C	[F]	kapacita
τ	[s]	časová konstanta
R_{iz}	[Ω]	izolační odpor
C_{50}	[F]	kapacita izolace změřená při 50 Hz
Pi	[-]	polarizační index

Obsah:

1. Úvod	2
2. Technická diagnostika	2
2.1 Řazení diagnostiky.....	2
2.2 Normy a předpisy.....	3
2.3 Provozní předpisy a legislativa.....	3
2.4 Trendy vývoje.....	4
3. Metody diagnostiky transformátorů VVN.....	4
3.1 On – line a off - line diagnostika	4
3.2 Měření činného odporu vinutí.....	5
3.3 Určení teploty vinutí.....	6
3.4 Měření převodu napětí naprázdno a magnetizačních proudů.....	6
3.5 Měření hodinového úhlu.....	7
3.6 Měření ztrátového činitele a kapacity, časová konstanta.....	8
3.7 Měření izolačního odporu, výpočet polarizačního indexu.....	13
3.8 Diagnostika kondenzátorových průchodek.....	15
3.9 Měření frekvenčních charakteristik transformátoru FRA.....	16
3.10 Odběry vzorků izolačního oleje	17
4. Porovnání diagnostiky jednotlivých typů transformátorů VVN	18
4.1 Odpojení z provozu a zajištění transformátoru	18
4.2 Specifikace transformátorů.....	18
4.3 Naměřené hodnoty činného odporu	19
4.4 Hodnoty převodů transformátoru a magnetizačních proudů.....	19
4.5 Ztrátový činitel tgδ a kapacita	21
4.6 Izolační stavy transformátorů	22
4.7 Frekvenční analýza	22
4.8 Diagnostika pevného dielektrika.....	25
4.9 Použité měřicí přístroje	26
4.10 Srovnání metod a jejich použitelnost.....	27
5. Zhodnocení a závěr	28
6. Literatura	29
Seznam příloh.....	30

1. Úvod

Pro úspěšné fungování lidské společnosti hrají klíčovou roli dokonalé informace ze všech oborů její činnosti. Totéž platí i pro elektrotechniku a energetiku.

Základní elektrická zařízení používaná při výrobě i přeměně elektrické energie na jiný druh energie, která jsou svým charakterem klíčová pro svět elektrotechniky, lze považovat za sériové spolehlivostní řetězce, u nichž selhání jednoho prvku znamená vyřazení celého zařízení z funkční činnosti. A proto právě elektrotechnika potřebuje vydatné a věrohodné informace o všech dějích, které v její oblasti probíhají. Jedná se o informace jak o prvcích (materiálech), tak systémech (strojích a zařízeních) ve všech fázích jejich vzniku i provozního života. Důležitost a význam diagnostických informací jsou zcela nezastupitelné.

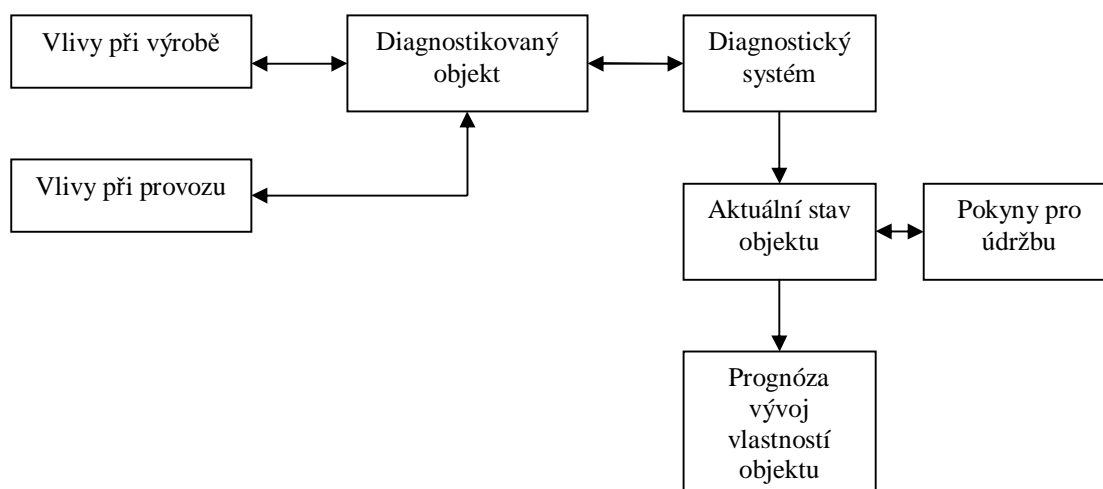
Tyto potřebné informace zajišťuje disciplína věnující se studiu dějů probíhajících při interakcích dotyčných zařízení s výrobou a posléze provozními podmínkami – diagnostika. Slovo diagnostika má své kořeny v řeckém slově *diagnosis* (rozpoznání, učení) a odtud tedy pochází význam slova diagnostika – určení stavu. Svými výroky diagnostika ovlivňuje všechny fáze výrobních činností a odhaduje příští chování diagnostikovaných objektů.

2. Technická diagnostika

Technická diagnostika je proces, při kterém se zjišťuje aktuální technický stav objektů na základě objektivního vyhodnocení příznaků pomocí měřicí techniky. Metodami technické diagnostiky můžeme stanovit míru degradace jednotlivých prvků a dílů měřeného objektu, popřípadě stanovit výskyt závad a částečných poruch zařízení. Obtížným úkolem technické diagnostiky je najít vztah mezi rozhodujícími funkčními vlastnostmi el. zařízení a některou měřitelnou veličinou. Z míry měřitelné veličiny musíme pak umět usoudit na funkční schopnost zařízení a také určit, zda změna vlastností je způsobena změnami struktury nebo vratným dějem.

2.1 Řazení diagnostiky

[1] Abychom alespoň přibližně odhadli vývoj vlastností diagnostikovaného objektu a jeho stav v budoucnosti (technická prognostika) je důležité rovněž vědět, jak se technický stav zařízení a jeho provozní vlastnosti vyvíjely do aktuálního stavu (technická genetika) a kteří degradační činitelé na něj působili, působí a působit budou.



Obr.1. Základní souvislost i při diagnostice elektrických zařízení

Vlastním cílem diagnostiky není měření, ale prodlužování životnosti zařízení, předcházení havárií a plánovitě a účelně provádění oprav a tím minimalizace nákladů na údržbu. Diagnostika pomáhá také k určování únosné hranice rizika dalšího provozu zařízení se závadou. [1]

2.2 Normy a předpisy

Každý výrobní podnik musí ve svém vlastním zájmu respektovat pravidla systému managementu jakosti zaměřená na podporu kvality produktů na národní úrovni dle ČSN EN ISO 9001:2001, případně respektování požadavků podle ČSN EN ISO 14000.

Diagnostika je dále zakotvena legislativně v těchto normách:

ČSN 60076-1	„Výkonové transformátory – Část 1: Všeobecně“
ČSN 60076-1 + A11	„Výkonové transformátory, 1998“
ČSN 35 1086	„Metody elektromagnetických zkoušek a měření odporu vinutí stejnosměrným proudem“
ČSN 35 1082	„Výkonové transformátory – Metody oteplovacích zkoušek“
ČSN IEC 354	„Pokyny pro zatěžování výkonových transformátorů, 1997“
ČSN EN ISO 12937	„Ropné výrobky – Stanovení vody- Coulometrickou titrační metodou podle Karl Fischera, 2003“
ČSN EN IEC 62021 – 1	„Izolační kapaliny – Stanovení kyselosti potenciometrickou metodou, 2004“
ČSN 34 6433, čl.2., ČSN EN 60567, IEC 60475, ISO 595-1	„Odběry izolačních olejů“

Činnost diagnostiky velkých netočivých strojů v energetice ČEZ, a.s. byla zakotvena v podnikových normách PN ČEZ 0005 „Profylaktika elektrických strojů netočivých- výkonové transformátory“ a pro měřicí transformátory PN ČEZ 0007 „Profylaktika elektrických strojů netočivých – přístrojové transformátory“ vydané v roce 2000. Pro podrobnější činnost diagnostiky na velkých netočivých strojích byl vypracován pracovní postup ČDS_PP_0024 r.01 v roce 2009 „Diagnostika elektrických zařízení VN a VVN – transformátory“ pro jednotné plnění Řádu preventivní údržby pro ČEZ Distribuční služby s.r.o.

2.3 Provozní předpisy a legislativa

[10] Stejně jako další výrobní technologie, dělí se i elektrozařízení z pohledu na výkon údržby do tří kategorií. Každá z kategorií zařízení má kritériálně oceněná rizika poruchy, spojená s provozem daného zařízení. Tato kritéria jsou hodnocením pravděpodobnosti vzniku poruchy.

1. U kategorií jedna a dvě se volí:

- a) údržba s předem stanovenými intervaly (preventivní údržba), která je zaměřena na udržení funkčnosti zařízení mezi údržbovými cykly. Preventivní údržba má své dané postupy s preventivní výměnou dílů podléhajících opotřebení a s odstraňováním dalších případných vad, zjištěných při kontrole zařízení.
- b) údržba dle technického stavu (prediktivní údržba), která je zaměřena na zásahy, prováděné na základě monitorování technických parametrů a hodnot odchylek, jejichž dosažení je signálem pro provedení příslušného údržbového zásahu.

2. U třetí kategorie zařízení se volí přednostně korektivní údržba. To je všude tam, kde náklady na preventivní údržbu převyšují za srovnatelné období náklady na korekci případných poruch.

2.4 Trendy vývoje

Ekonomicky efektivní použití prediktivní údržby je závislé na kvalitě analýzy degradace významných parametrů zařízení a způsobu volby optimálního termínu údržbového zásahu. Informace potřebné k přijetí rozhodnutí o údržbovém zásahu získáváme prostřednictvím diagnostických metod izolačních systémů elektrických strojů.

V Diagnostickém řádu jsou transformátory rozděleny podle svého zařazení ve výrobě - na vývodové, odbočkové (blokové vlastní spotřeby), napájení společné vlastní spotřeby a na malé distribuční transformátory. Těmto skupinám jsou přiřazeny četnosti odběrů vzorků izolačního oleje na chromatografický rozbor (DGA), komplexní rozbor a četnost měření, prováděných na pevné izolaci. V současné době se např. u vývodových transformátorů rozvolňuje četnost měření na pevné izolaci v souladu s prodloužením periody odstávek výrobních bloků do tzv. běžných oprav z jednoho roku na dva. Zároveň se u těchto transformátorů zvyšuje počet odběrů izolačního oleje na DGA ze dvou na tři ročně. Rovněž trendy vývoje parametrů izolačního oleje z komplexního rozboru a trendy hodnot z měření pevné izolace se vyhodnocují a vše se srovnává ve vzájemné interakci.

Z hlediska spolehlivosti energetické soustavy jsou transformátory jedny z klíčových prvků. Vlivem provozních podmínek dochází ke stárnutí jednotlivých částí transformátorů a tím i ke změnám důležitých elektrických a mechanických vlastností. Cílem diagnostiky transformátorů je ověření, zda stroj vyhovuje a splňuje stanovené podmínky v souladu s předepsanými normami, eventuálně nový stroj odpovídá zadání objednávky v plném rozsahu.

Nejdůležitějším faktorem pro spolehlivý chod transformátorů je dobrý stav izolace vinutí. Izolace musí odolávat teplotám, mechanickému namáhání, vlhkosti, působením agresivních látek a vodivému prachu. Je důležité také věnovat pozornost kvalitě provedení vinutí, průchodkám, přepínači odboček a neposlední řadě také kvalitnímu připojení silových svorek z důvodu přechodových odporů.

3. Metody diagnostiky transformátorů VVN

3.1 On – line a off - line diagnostika

Diagnostické metody dělíme do dvou skupin podle způsobu měření na:

- On – line diagnostiku (jde o nepřetržité sledování stavu strojů při jejich běžném provozu)

Přístroje s pevnou montáží na monitorovaném objektu včasné varují před vznikem a rozvojem poruchy, jež by mohla vést k poškození zařízení a neplánovaným výpadkům provozu. Přístroje jsou navzájem propojeny pomocí komunikačních síťových rozhraní k centrálnímu počítači s vyhodnocovacím softwarem. Umožňují upozornění obsluhy na potřebu diagnostiky nebo nápravných opatření.

- Off – line diagnostiku (běžně používané zkoušky při odstavení stroje z provozu)

[9]U off - line systému se provádí diagnostikování testem, který využívá ke zjištění stavu objektu signály získané v dílčích kontrolách měření generované zdrojem signálu. Výsledkem jsou odezvy objektu na signál, které určují aktuální stav objektu, přičemž je diagnostikovaný objekt po celou dobu testování mimo provoz. Nevýhodou je však pevně stanovená periodičita, která ne vždy vychází z aktuálního stavu zařízení a je určována dle pevně stanovených dob. Mezi výhody patří dobrá aplikovatelnost diagnostikovaných metod při odstávce.

3.2 Měření činného odporu vinutí

[4] Měření činného odporu se provádí na všech vinutích transformátoru jak vstupních, výstupních i terciárních zároveň i s jednotlivými polohami přepínače odboček vinutí. Teplota stroje by měla být přibližně stejná jako teplota okolí. Pro měření je třeba provést silové odpojení transformátoru.

Velikost proudu při měření nesmí převýšit 0,2 násobek hodnoty jmenovitého proudu měřeného vinutí. Pro snížení doby ustálení proudu se doporučuje volit hodnotu proudu nejméně

$$2 \cdot \sqrt{2 \cdot I_0}$$

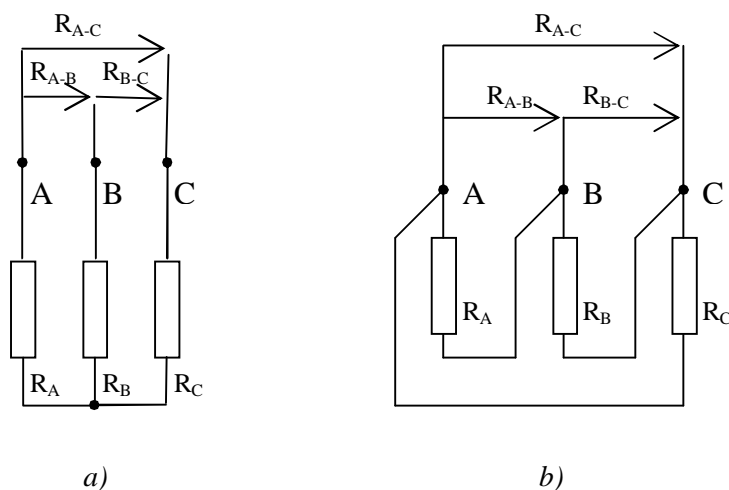
I_0 ...efektivní hodnota proudu naprázdno odpovídající jmenovitému napětí transformátoru

Jsou – li fáze trvale spojeny do hvězdy nebo trojúhelníku, měříme odpor mezi jednotlivými vývody vinutí A,B,C nebo – li R_{A-B} , R_{A-C} , R_{B-C} .

Pro výpočet střední hodnoty odporu jedné fáze (pokud jsou hodnoty naměřených odporů přibližně stejné) můžeme stanovit odpor jedné fáze R_f ze vztahu

$$R_s = \frac{1}{6} \cdot (R_{AB} + R_{AC} + R_{BC}) \quad [\Omega] ,$$

$$R_f = \frac{1}{2} \cdot R_s \text{ pro zapojení do hvězdy, } R_f = \frac{3}{2} \cdot R_s \text{ pro zapojení do trojúhelníku}$$



Obr.2 Možnosti zapojení vinutí: a) vinutí zapojené do hvězdy, b) vinutí zapojené do trojúhelníku

Regulovaný zdroj proudu se připojí na svorky vývodů transformátoru, a to mezi fází a střed nebo mezi dvě fáze (podle protokolu výrobce). U regulačního transformátoru musí být zařazena odbočka, uvedená v protokolu výrobce (obvykle střední).

Ostatní vinutí (nikoliv ostatní fáze téhož vinutí) se spojí nakrátko, aby se snížilo riziko poškození přístrojů v případě náhlého rozpojení proudového obvodu. Vinutí, na kterém se provádí měření odporu se doporučuje spojit s kostrou stroje aby se zabránilo působení interferencí.

Připojení přístroje na měřené části obvodu musí být dokonalé, aby úbytek napětí na přechodovém odporu byl zcela zanedbatelný.

Po připojení napětí a ustálení měřicího proudu se odečítají hodnoty napětí a proudu. Za ustálený údaj se považuje hodnota, která se po dobu 30s nezmění více než o 1%.

Při měření je nutno dbát, aby nedošlo k poškození měřicího přístroje vlivem indukčnosti měřeného vinutí. Měřicí obvod se nesmí náhle rozpojit a snižování měřicího proudu (vybíjení) musí být pozvolné.

3.3 Určení teploty vinutí

[4] Teplota vinutí je údaj, důležitý pro správné vyhodnocování diagnostických metod, zejména měření izolačního odporu, kapacity a ztrátového činitele. Ke hrubému stanovení teploty postačí údaj teploměrů, instalovaných na transformátoru. Přitom je třeba si uvědomit, že se měří teplota oleje pod víkem nádoby stroje a teplotě vinutí odpovídá při ustáleném stavu. U některých velkých transformátorů bývají instalovány dva teploměry, z nichž jeden měří teplotu oleje u dna transformátoru. V takovém případě je pro další úvahy používána průměrná hodnota údajů, odečtených na obou teploměrech. Pro přesné stanovení teploty se provádí měření odporu vinutí transformátoru s následným výpočtem, pro který je nutno znát údaj odporu vinutí při známé teplotě - dokumentace výrobce.

Teplota vinutí transformátoru se vypočítá podle vzorce:

$$t_x = \frac{R_x}{R_o}(t_o + 235) - 235 \quad [^{\circ}\text{C}, \Omega, \Omega, ^{\circ}\text{C}]$$

Kde:

- t_x - neznámá teplota
- R_o - odpor vinutí při známé teplotě
- R_x - odpor vinutí změřený při neznámé teplotě
- t_o - známá teplota (údaj výrobce)

3.4 Měření převodu napětí naprázdno a magnetizačních proudů

[4] Stav transformátoru naprázdno znamená, že proud v sekundárním obvodu $I_2 = 0$. Přesto primárním vinutím protéká tzv. magnetizační proud, jenž je nutný pro vybuzení magnetického pole v magnetickém obvodu transformátoru při jmenovitém napětí U_{IN} . Měření slouží jako velmi jednoduchá a rychlá kontrola vinutí transformátoru a přepínače odboček. Pomocí tohoto měření lze odhalit závitové zkratky, přerušení obvodu, poruchy na přepínači odboček či voliči odboček.

Postup měření s voltmetry a ampérmetry:

Je nezbytně nutné provádět toto měření ještě před případným připojením transformátoru na stejnosměrné napětí například při měření odporu vinutí.

Stroj se napájí na straně VVn napětím do 10% jmenovitého napětí (například napětím 3 x 400 V o síťovém kmitočtu) ve všech fázích. Měří se magnetizační proudy v obvodu vinutí VVn a napětí mezi všemi fázemi VVn a Vn (u třívinutových strojů) a to na všech odbočkách. Alternativně lze měřit fázové napětí na straně terciálního vinutí.

Před měřením, v jeho průběhu a po jeho skončení musí být zaznamenány hodnoty napájecího napětí. Tento způsob měření je dovolen jestliže rozdíl mezi sduženými napájecími napětími je menší

než 2 %. Napájecí napětí by nemělo kolísat aby měření nebylo znehodnoceno. Při měření převodu napětí naprázdno pomocí analogových voltmetrů lze kontrolovat stav přepínače odboček při změně odbočky. Přepnutí odbočky (a následně změn napětí na měřicím přístroji) musí být plynulé, výchylky přístrojů ve všech fázích musí být obdobné a nesmí dojít k přerušení obvodu (důvod pro odstavení stroje z provozu za účelem provedení údržby nebo opravy přepínače odboček).

Převod transformátoru je poměr napětí primárního k napětí sekundárnímu nebo počtu závitů obou vinutí nebo také obrácený poměr proudů zmíněných vinutí při zkoušce nakrátko.

$$p = \frac{U_1}{U_2}$$

p – převod transformátoru [-]

U_1 - napětí na straně vinutí VV_n [V]

U_2 - napětí na straně vinutí V_n [V]

Při jednofázovém napájení trojfázových transformátorů se skupinou spojení Dy a Yd se kontroluje převod podle fázových napětí při postupném zkratu fází. Jedna z fází například A , se zapojí do zkratu spojením odpovídajících svorek daného vinutí a potom se při jednofázovém napájení kontroluje převod napětí naprázdno zbylé dvojice fází.

Tento se při uvedené metodě zapojení rovna $2 K_f$ pro skupinu spojení Dy při napájení ze strany hvězdy.

Pro skupinu spojení Yd při napájení ze strany trojúhelníka se rovná $0,5 K_f$. Pod označením K_f rozumíme fázový převod napětí naprázdno.

Podobným způsobem se měří při zkratu fází B a C .

Hodnoty napájecího napětí by neměli kolísat aby měření nebylo znehodnoceno.

3.5 Měření hodinového úhlu

Jedním z důležitých štítkových údajů transformátoru je úhel natočení fází, tzv. hodinový úhel. Tento údaj je důležitý pro paralelní chod transformátorů. Je definován jako úhel měřený od fázoru sdruženého napětí strany vyššího napětí k fázoru sdruženého napětí strany nižšího napětí ve směru chodu hodinových ručiček, vyjádřený v hodinách ($30^\circ = 1h$).

Hodinový úhel závisí na zapojení vinutí transformátoru a na označení jeho svorek. Zapojení vinutí transformátoru (se dvěma vinutími) se udává znakem spojení, který sestává ze dvou písmen a jedné číslice. První velké písmeno udává zapojení vinutí strany vyššího napětí, druhé malé písmeno udává zapojení vinutí strany nižšího napětí a číslice udává hodinový úhel. Písmeno Y, y označuje zapojení do hvězdy, D, d zapojení do trojúhelníka a Z zapojení do lomené hvězdy, které se používá jen na straně nižšího napětí při nerovnoměrném zatížení transformátoru.

Znak spojení $Yd 1$ znamená, že strana vyššího napětí je zapojena do hvězdy, strana nižšího napětí do trojúhelníka a hodinový úhel je jedna hodina. Nejpoužívanější jsou hodinové úhly $0, 1$ a 11 , méně používané jsou $5, 6$ a 7 , nelze provést 3 a 9 . Svorky vinutí jednotlivých fází se označují v abecedním pořadí zleva do prava při pohledu ze strany vyššího napětí A, B, C a na straně nižšího napětí a, b, c (alternativně se používá $L1, L2, L3$, zahraniční literatura uvádí U, V, W). Je-li vyveden uzel vinutí, označuje se N nebo n a je vlevo od fázových svorek při pohledu ze strany nižšího napětí.

Postup měření pomocí voltmetru:

Pro určení hodinového úhlu existuje několik měřicích metod. Jedna z nich využívá měření napětí transformátoru voltmetrem. Stroj se napájí napětím minimálně $100 V$ na straně vyššího napětí ve všech fázích a propojí se svorky $A - a$. Měří se napájecí napětí $A - B$ (kontroluje se i na svorkách

A – B – C) a dále se měří napětí na svorkách B – b, B – c, C – c, C – b, dle potřeby a – b. Je-li převod příliš malý, může se stát, že některý z voltmetrů nebude mít dostatečný rozsah. Potom je třeba upravit napájecí napětí.

1	2	3	Hodinový úhel
$U_{Bb} = U_{Cc}$	$U_{Bb} < U_{Bc}$		0
	$U_{Bc} = U_{Cb}$		6
$U_{Bb} = U_{Cb} = U_{Cc}$	$U_{Bb} < U_{Bc}$		1
	$U_{Bb} > U_{Bc}$		7
$U_{Bb} = U_{Bc} = U_{Cc}$	$U_{Bb} > U_{Cb}$		5
	$U_{Bb} < U_{Cb}$		11
$U_{Bb} = U_{Cc}$	$U_{Bb} < U_{AB}$		2
	$U_{Bc} > U_{AB}$		
	$U_{Bb} < U_{AB}$		10
	$U_{Bc} < U_{AB}$		
	$U_{Bb} > U_{AB}$	$U_{Bc} < U_{AB} + U_{ab}$	3
	$U_{Bc} > U_{AB}$	$U_{Bc} = U_{AB} + U_{ab}$	4
	$U_{Bb} > U_{AB}$	$U_{Cb} = U_{AB} + U_{ab}$	8
	$U_{Bc} < U_{AB}$	$U_{Cb} < U_{AB} + U_{ab}$	9

Tab. 1. Vyhodnocení naměřených hodnot napětí

Výsledný hodinový úhel musí souhlasit se štítkovým údajem transformátoru.

3.6 Měření ztrátového činitele a kapacity, časová konstanta

[4] Velikost ztrátového činitele ($tg \delta$) je přímo úměrná ztrátám energie, které jsou rozptýleny v dielektriku při jeho namáhání proměnným elektrickým polem.

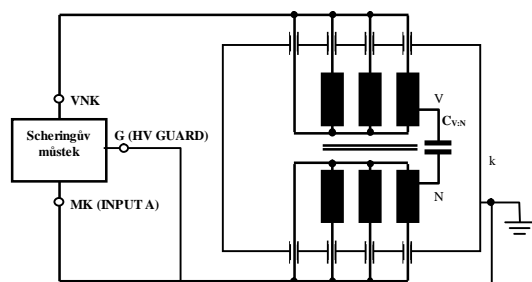
Měření ztrátového činitele izolační soustavy transformátoru a jeho kapacity má značný význam pro posouzení jejího stavu a dalšího profylaktického sledování. Velikost ztrátového činitele je ovlivněna polarizací měřeného dielektrika (množstvím přítomných polárních látek, např. vody, reakčních produktů stárnutí a tepelného namáhání izolace, mechanických mikronečistot), teplotou či cirkulací izolačního média. Ztrátový činitel je v absolutní hodnotě bezrozměrný údaj. V praxi se často používá údaj vynásobený 10^2 . Kapacita se obvykle udává v pF .

Měření kapacity a ztrátového činitele se provádí střídavým napětím 10 kV. Pokud tomuto napětí nevyhovuje izolační hladina měřeného vinutí, použije se zkušební napětí nižší, a to z řady 0,5-1-2-5 kV (např. pro vinutí izolační hladiny 6,3 kV použijeme měřicí napětí 5 kV). Z důvodu eliminace rušení se měření provádí při obou polaritách napájecího napětí vn zdroje. Pokud je to možné doporučuje se provádět měření při teplotě stroje $30^{\circ}C$ až $20^{\circ}C$ při přirozeném chladnutí stroje odstaveného z provozu. V případě strojů s nuceným chlazením, lze k měření přistoupit až po ustálení přirozených poměrů ve stroji, tj. nejméně 3 hodiny po vypnutí čerpadel. Pro přesnější stanovení teploty stroje se doporučuje provést měření odporu vinutí.

- *Měření transformátoru s dvojím vinutím:*

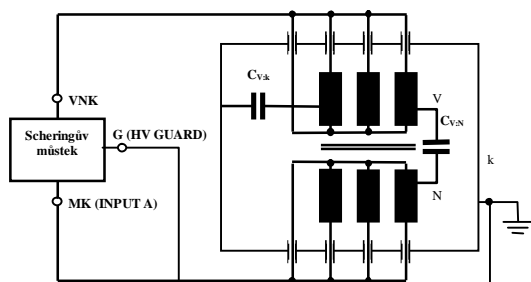
Pomocí příslušných kabelů se připojí měřicí můstek k transformátoru, přičemž kabel VNK se zapojí na vinutí vyššího napětí a měřicí kabel MK na vinutí nižšího napětí. Kostra (zem) napájecího zdroje můstku se spojí s nádobou transformátoru.

- Proměří se všechny kombinace, tj. UST, GST a GSTg (symbolický zápis $V:N \Leftrightarrow \text{UST}$, $V:N+k \Leftrightarrow \text{GST}$ a $V:k \Leftrightarrow \text{GSTg}$).
- Po změně polarit napájecího zdroje (záměna napájecích vodičů L a N) se výše uvedená měření zopakují.
- Po záměně kabelů VNK a MK se měření zopakují (při obou "polaritách", symbolický zápis $N:V \Leftrightarrow \text{UST}$, $N:V+k \Leftrightarrow \text{GST}$ a $N:k \Leftrightarrow \text{GSTg}$).
- Nakonec se kabel VNK připojí na obě vodivě spojená vinutí a provede se měření GSTg (při obou "polaritách", symbolický zápis $V+N:k$).



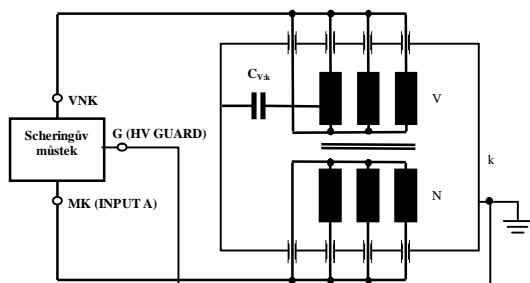
Kombinace UST (*Ungrounded Specimen Test*), pro měření na neuzemněném objektu:

- 1) Měří se kapacita a ztrátový činitele vinutí V proti N.
- 2) Kostra (zem) je uzemněná.



Kombinace GST (*Grounded Specimen Test*), pro měření na uzemněném objektu:

- 1) Vinutí N je můstkem spojeno s kostrou.
- 2) Měří se tedy kapacita a ztrátový činitele vinutí V proti N zároveň s kapacitou V proti k.



Kombinace GSTg (*Grounded Specimen Test with guarding*), pro měření na uzemněném objektu:

- 1) Měří se kapacita a ztrátový činitele vinutí V proti k.
- 2) Vinutí N je na nulovém potenciálu virtuálně vytvořeném můstkem.

Obr. 3. Schémata zapojení pro měření kapacity a ztrátového činitele transformátoru s dvojím vinutím v zapojeních $V:N$, $V:N+k$ a $V:k$.

Hodnoty ztrátového činitele a kapacity se vypočtou z naměřených hodnot při obou "polaritách" podle vzorců:

$$tg\delta = \frac{tg\delta_1 \cdot C_1 + tg\delta_2 \cdot C_2}{C_1 + C_2},$$

$$C = \frac{C_1 + C_2}{2}$$

kde index 1 označuje hodnoty změřené při základní polaritě a index 2 hodnoty změřené při opačné polaritě.

Z provedených měření získáme následující soubor výsledků:

Připojení kabelů	Kombinace	Kapacita	Ztrátový činitel
Kabel VNK na vinutí V a kabel MK na vinutí N	UST	$C_{V:N}$	$tg\delta_{V:N}$
	GST	$C_{V:N+k}$	$tg\delta_{V:N+k}$
	GSTg	$C_{V:k}$	$tg\delta_{V:k}$
Kabel VNK na vinutí N a kabel MK na vinutí V	UST	$C_{N:V}$	$tg\delta_{N:V}$
	GST	$C_{N:V+k}$	$tg\delta_{N:V+k}$
	GSTg	$C_{N:k}$	$tg\delta_{N:k}$
Kabel VNK na vinutí V+N	GSTg	$C_{V+N:k}$	$tg\delta_{V+N:k}$

Tab. 2. Jednotlivá zapojení a kombinace měření ztrátového činitele transformátoru s dvojitým vinutím

Jestliže pro naměřené hodnoty přibližně platí následující vztahy lze usuzovat na správnost provedeného měření:

$$C_{V:N} = C_{N:V},$$

$$C_{V:N} + C_{V:k} = C_{V:N+k},$$

$$C_{V:k} + C_{N:k} = C_{V+N:k}.$$

Pro naměřené hodnoty ztrátového činitele platí vztah:

$$tg\delta_{V:N} = tg\delta_{N:V}.$$

Tedy pro každé připojení kabelů u něhož se měří všechny tři kombinace, tj. UST, GST a GSTg musí platit:

$$C_{GST} = C_{UST} + C_{GSTg},$$

$$tg\delta_{GST} = \frac{tg\delta_{UST} \cdot C_{UST} + tg\delta_{GSTg} \cdot C_{GSTg}}{C_{UST} + C_{GSTg}}.$$

- *Měření transformátoru s trojím vinutím:*

Jedná se zde především o transformátory s vyvedeným terciálním vinutím

Připojení kabelů	Kombinace	Kapacita	Ztrátový činitel
Kabel VNK na vinutí V a kabel MK na vinutí S+N (vinutí S a N spojena)	UST GST GSTg	$C_{V:S+N}$ $C_{V:S+V+k}$ $C_{V:k}$	$tg\delta_{V:S+N}$ $tg\delta_{V:S+V+k}$ $tg\delta_{V:k}$
Kabel VNK na vinutí S a kabel MK na vinutí V+N (vinutí V a N spojena)	UST GST GSTg	$C_{S:V+N}$ $C_{S:V+N+k}$ $C_{S:k}$	$tg\delta_{S:V+N}$ $tg\delta_{S:V+N:k}$ $tg\delta_{S:k}$
Kabel VNK na vinutí N a kabel MK na vinutí V+S (vinutí V a S spojena)	UST GST GSTg	$C_{N:V+S}$ $C_{N:V+S+k}$ $C_{N:k}$	$tg\delta_{N:V+S}$ $tg\delta_{N:V+S:k}$ $tg\delta_{N:k}$
Kabel VNK na vinutí V+S a kabel MK na vinutí N (vinutí V a S spojena)	UST GST GSTg	$C_{V+S:N}$ $C_{V+S:N+k}$ $C_{V+S:k}$	$tg\delta_{V+S:N}$ $tg\delta_{V+S:N+k}$ $tg\delta_{V+S:k}$
Kabel VNK na vinutí V+S+N (vinutí V, S a N spojena)	GSTg	$C_{V+S+N:k}$	$tg\delta_{V+S+N:k}$

Tab. 3. Jednotlivá zapojení a kombinace měření ztrátového činitele transformátoru s trojitým vinutím

Stejně jako u dvouvinutových transformátorů musí pro každé připojení kabelů u něhož se měří všechny tři kombinace, tj. UST, GST a GSTg platit:

$$C_{GST} = C_{UST} + C_{GSTg},$$

$$tg\delta_{GST} = \frac{tg\delta_{UST} \cdot C_{UST} + tg\delta_{GSTg} \cdot C_{GSTg}}{C_{UST} + C_{GSTg}}.$$

Jestliže pro naměřené hodnoty přibližně platí následující vztahy lze usuzovat na správnost provedeného měření:

$$C_{V:k} + C_{S:k} + C_{N:k} = C_{N:k} + C_{V+S:k} = C_{V+S+N:k},$$

$$C_{V:k} + C_{S:k} = C_{V+S:k},$$

$$C_{V+S:N} = C_{N+V:S}.$$

Pro naměřené hodnoty ztrátového činitele platí vztah:

$$tg\delta_{V+S:N} = tg\delta_{N+V:S}.$$

- *Měření transformátoru s jedním vinutím:*

Například kompenzační tlumivky a reaktory

Připojení kabelů	Kombinace	Kapacita	Ztrátový činitel
Kabel VNK na vinutí V	GSTg	$C_{V:k}$	$\operatorname{tg}\delta_{V:k}$

Tab. 4. Zapojení a pro měření ztrátového činitele transformátoru s jedním vinutím

Výpočet časové konstanty

Hodnota časové konstanty se vypočte podle vztahu:

$$\tau = R_{iz60} \times C_{50} \text{ (s) , kde}$$

R_{iz60} - izolační odpor odečtený v čase 60 sekund po zapojení měřicího napětí,

C_{50} - kapacita izolace změřená při 50 Hz.

Časová konstanta se vypočte samostatně pro všechna zapojení, u nichž byl měřen jak izolační odpor, tak i kapacita.

Absolutní velikost časové konstanty není závislá na geometrických rozměrech vinutí stroje, což v praxi znamená možnost objektivního vyhodnocení stavu izolační soustavy bez ohledu na výkon a typ stroje.

Ztrátový činitel je výrazně teplotně závislá veličina (s rostoucí teplotou stroje se zhoršuje hodnota ztrátového činitele) viz. převodní tabulka z výňatku normy ANSI / IEEE, C 57.12.90 – 1980.

Teplota měřeného objektu T (°C)	Koeficient pro přepočet K
10	0,80
15	0,90
20	1,00
25	1,12
30	1,25
35	1,40
40	1,55
45	1,75
50	1,95
55	2,18
60	2,42
65	2,70
70	3,00

Tab. 5. Převodní tabulka pro minerální olej jako izolační kapalinu

Vztah pro přepočet ztrátového činitele na 20 °C:

$$\operatorname{tg}\delta_{20} = \operatorname{tg}\delta_{mT} / K \quad , \text{ Kde:}$$

$$\operatorname{tg}\delta_{20} = \operatorname{tg}\delta \text{ pro } 20^\circ\text{C}$$

$$\operatorname{tg}\delta_{mT} = \operatorname{tg}\delta \text{ naměřený při teplotě } T$$

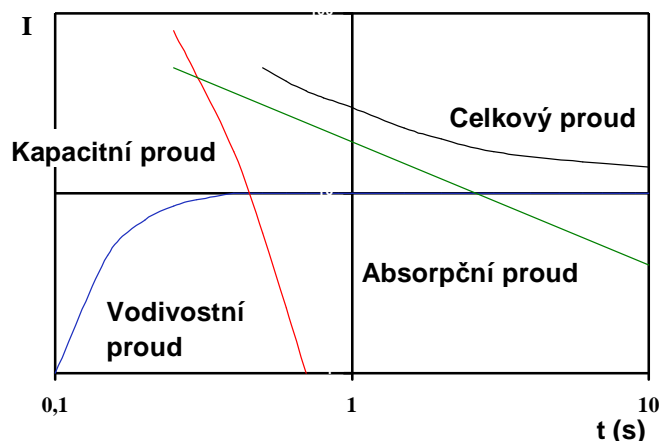
T = teplota měřeného objektu

K = koeficient pro přepočet

3.7 Měření izolačního odporu, výpočet polarizačního indexu

[4] Měření izolačního odporu je jednou z nejstarších technik ověřování stavu izolační soustavy transformátorů a zhášecích tlumiviek. Proud protékající izolační soustavou má tři složky:

- *kapacitní proud* je vyvolán vnitřním odporem zdroje, zaniká velice rychle v okamžiku, kdy přiložíme na zkoušený předmět plné napětí
-
- *absorpční proud* je způsoben polarizací dielektrika,
- *vodivostní proud* (svodový) je proud protékající izolací (způsobuje činné ztráty v izolaci).



Obr. 4. Proudy protékající dielektrikem po připojení stejnosměrného napětí.

Polarizační index p_i je veličinou charakterizující stav izolace (přítomnost vlhkosti v izolaci) a stanoví se z časové závislosti průběhu izolačního odporu. Stanovuje se jednominutový polarizační index p_{i60} .

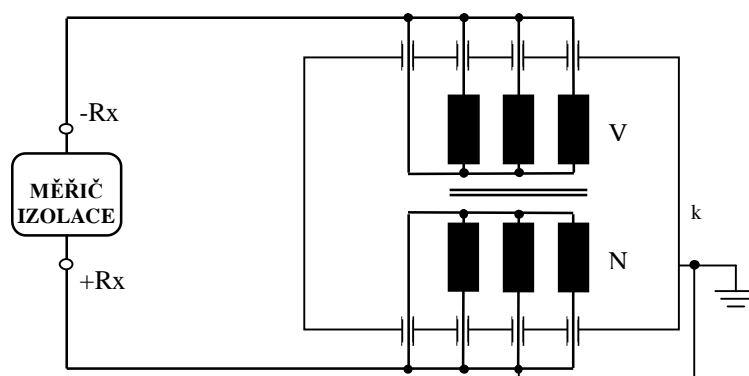
Měření izolačního odporu se provádí stejnosměrným napětím 1 až 5 kV, přičemž doporučená hodnota je 2,5 kV. Hodnota přiloženého stejnosměrného napětí by neměla být vyšší než 0,5 násobek hodnoty zkušební napětí kmitočtu 50 Hz. Pokud je to možné doporučuje se provádět měření při teplotě stroje 30 až 20°C při přirozeném chlazení stroje odstaveného z provozu.

- *Měření transformátoru s dvojitým vinutím:*

Záporný pól měřicího přístroje se připojí na vinutí V, kladný na kostru (nádobu transformátoru). S kostrou (zemí) se spojí rovněž vinutí N. S přiložením napětí se zároveň začne měřit čas. Hodnoty izolačního odporu se odečítají po 15 a 60 sekundách (symbolický zápis zapojení V:N+k).

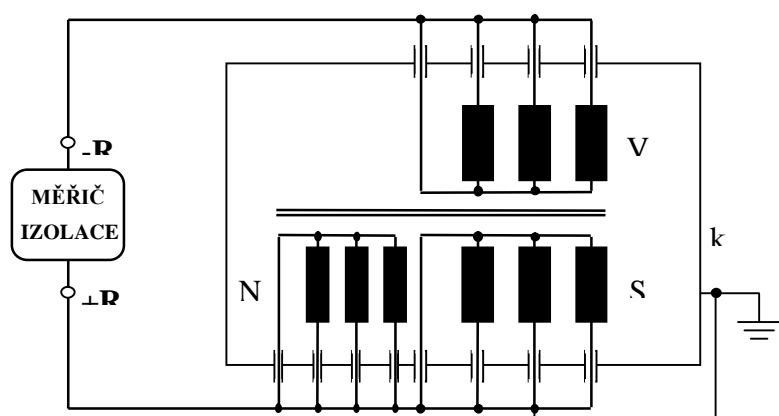
Stejně se postupuje po přepojení na vinutí N (vinutí V se ukostří, symbolický zápis zapojení N:V+k).

Nakonec se provede měření izolačního odporu obou vinutí proti kostře k (záporný pól se přiloží na obě spojená vinutí, kladný pól se spojí s kostrou, symbolický zápis zapojení V+N:k). Mezi jednotlivými měřeními je 3-minutový vybíjecí interval, který je třeba přísně dodržovat, aby nedošlo ke zkreslení naměřených hodnot vlivem zbytkového náboje.



Obr.5. Schéma zapojení pro měření izolačního odporu dvouvinutového stroje v zapojení V:N+k

- Měření transformátoru s trojím vinutím:



Zápis měřených zapojení:

- 1) V:S+N+k
- 2) S:V+N+k
- 3) N:V+S+k
- 4) V+S+N:k
- 5) V+S:N+k

Obr. 6. Schéma zapojení pro měření izolačního odporu trojvinutového stroje V:S+N+k

Jednominutový polarizační index se vypočte ze vztahu:

$$p_{i60} = \frac{R_{iz60}}{R_{iz15}} [-]$$

kde,

R_{iz15} - izolační odpor v $M\Omega$ odečtený v čase 15 sekund po připojení měřicího napětí,

R_{iz60} - izolační odpor v $M\Omega$ odečtený v čase 60 sekund po připojení měřicího napětí.

Izolační odpor je výrazně teplotně závislá veličina. S rostoucí teplotou stroje klesá hodnota izolačního odporu.

3.7 Diagnostika kondenzátorových průchodek

[4]Velikost ztrátového činitele je přímo úměrná ztrátám energie rozptýlené v dielektriku při jeho namáhání proměnným elektrickým polem. Jestliže budou tyto ztráty, jež se přeměňují v teplo, dostatečně velké, pak může dojít při současném působení tepla od vinutí k tepelnému narušení jak izolační soustavy průchodky, tak i vodiče a k následné destrukci průchodky. Pro posouzení stavu izolační soustavy kondenzátorové průchodky v provozu se měří kapacita a ztrátový činitel. Hodnoty ztrátových činitelů nových průchodek naměřené u výrobce a po instalaci průchodky do transformátoru musí být stejné a jsou referenčními hodnotami pro všechna další diagnostická měření. Při měřeních se kromě velikosti naměřených hodnot vyhodnocuje jejich časová závislost (trend) a tak zvaná napěťová závislost. Je to velmi důležitý parametr pro hodnocení navlhlosti dielektrického systému kondenzátorové průchodky.

Kapacita je velmi důležitý údaj pro sledování izolačního stavu. Změna kapacity signalizuje vážnou poruchu uvnitř izolační soustavy (například průraz mezi polepy průchodky). Kapacita se na rozdíl od hodnot ztrátového činitele, který se může vlivem teploty a absorbované vlhkosti uvnitř izolační soustavy měnit, kapacita průchodky při napětích, která přicházejí při provozních měřeních v úvahu, se nesmí u nových průchodek lišit od hodnoty udané výrobcem o hodnotu vyšší, než $\pm 1\%$ původní hodnoty, změřené u výrobce. Měření kapacity se provádí zpravidla při měření ztrátového činitele a pokud není použit automatický můstek, stanoví se při měření s použitím klasického Scheringova zapojení ze vztahu:

$$C_1 = C_n \frac{R_4}{R_3}$$

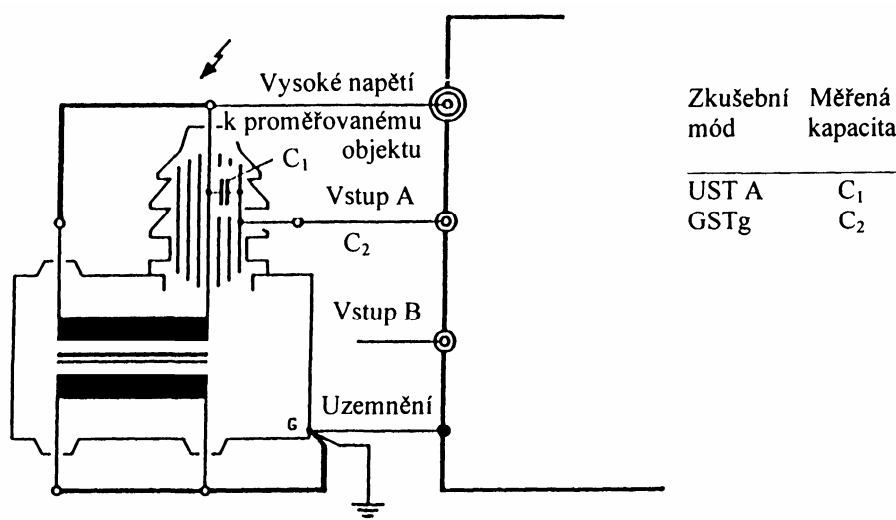
kde

C_1 je měřená kapacita izolačního uspořádání,

C_n je kapacita použitého kapacitního normálu,

R_3 je odpor ve větvi měřené kapacity,

R_4 je odpor v normálové větvi můstku.



Obr.7 Schéma zapojení měřicího obvodu při měření ztrátového činitele kondenzátorových průchodek

3.8 Měření frekvenčních charakteristik transformátoru FRA

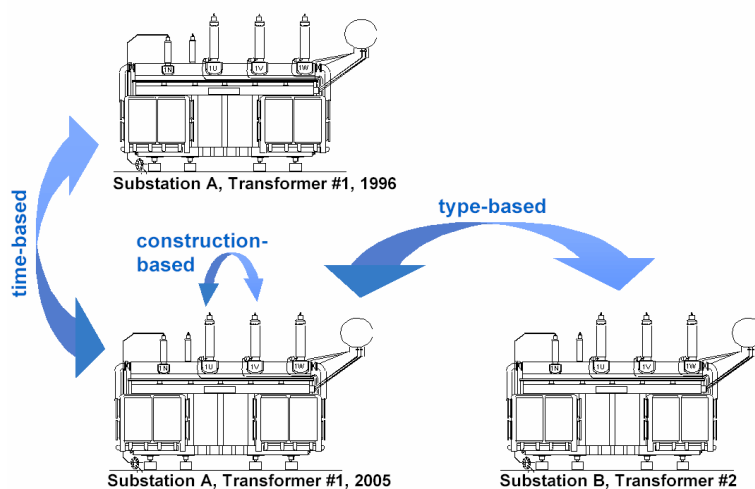
Metoda frekvenčních charakteristik FRA je určena k detekci poruch vinutí transformátorů, jakými jsou např. mezizávitový zkrat nebo deformace vinutí. Je založena na skutečnosti, že každé vinutí transformátoru představuje určité uskupení mezizávitových kapacit, kapacit vinutí k zemi, vzájemných a vlastních indukčností a odporu vinutí. Toto uskupení je charakterizováno svojí frekvenční charakteristikou, tedy závislostí útlumu napětí na frekvenci. Každý mezizávitový zkrat nebo deformace vinutí, které znamenají určitou změnu některé kapacity nebo indukčnosti, se projeví změnou průběhu frekvenční charakteristiky. Detekce těchto změn je předmětem metody frekvenčních charakteristik.

Tato metoda dokáže detekovat tyto druhy závad: přídavné závity na magnetickém jádře nebo spojce, mezizávitové zkraty, přerušená vinutí, vadné uzemnění jádra, zhroucení vinutí, zlomené nebo ztracené svorky, mechanické poškození vinutí, mechanické poškození jádra, uvolněné závity a stárnutí.

Aktuální měření se porovnává se souborem referenčních měření (předchozí měření). Pro měření je vhodné transformátor odpojit od vedení a dodržet vždy shodné podmínky pro porovnávání měření (stejná poloha přepínače odboček, totéž zapojení všech vinutí, podobné rozmístění měřicích kabelů apod.). Odpovídající VF obvod vinutí transformátorů představuje komplexní R-L-C člen - dvojbran. Změřená frekvenční odezva (přenosová funkce) tohoto prvku je unikátní, podobně jako otisk prstu. Pokud opakované měření ukazuje odchylku, znamená to, že došlo ke změně v geometrii vinutí. Dokonce i velmi malé posuny nebo deformace vinutí způsobují čitelné změny měřené přenosové funkce, což je zřetelně detekovatelné. U měření frekvenčních charakteristik je vyžadováno citlivé měření napětí. Aby bylo dosaženo co nejpřesnějších výsledků, je nutné minimalizovat ovlivnění a vazby mezi kabely.

Metody porovnávání

Diagnostika FRA sestává z měření impedance vinutí transformátoru v širokém rozsahu frekvencí a porovnání výsledků těchto měření se souborem referenčních měření. V ideálním případě jsou jako referenční měření brána předchozí měření stejných vinutí stejného transformátoru. Pokud nejsou dostupná, mohou být získána z měření jiné fáze stejného transformátoru, pokud je jistota, že toto vinutí není poškozeno nebo z jiného transformátoru stejného typu. Porovnání probíhá obvykle srovnáním pouhým okem. Při vizuálním srovnávání, vloží autor výsledky do grafu s logaritmicko-lineární stupnicí. Oba srovnávané soubory měření jsou vloženy do stejných os. Pokud jsou k dispozici také další měření, mohou být také přidána ke srovnání. Při vizuálním srovnávání souborů měření jsou klíčové indikátory poškození změny celkového tvaru grafu, vytvoření nových rezonančních frekvencí nebo eliminace stávajících, velké posuny existujících rezonančních frekvencí. [6]



Obr. 8. Typy porovnávání frekvenční analýzy transformátoru

3.9 Odběry vzorků izolačního oleje

[7] Odběrům vzorků izolačních olejů, jejich uskladnění a dopravě do laboratoře je nutno věnovat náležitou pozornost. V opačném případě i při pečlivém provedení jednotlivých zkoušek lze snadno získat zkreslené, nereprodukovatelné výsledky, které mohou vést k chybným závěrům o jakosti izolačního oleje. Při nevhodném odběru, skladování a dopravě může dojít k navlhnutí oleje, k desorpci rozkladových plynů nebo naopak k nasycení vzdušnými plyny, k fyzikálně-chemickým změnám a pod.

Vzorky izolačních olejů se odebírají pokud možno bez přístupu vzduchu injekční stříkačkou, pomocí vzorkovací trubice, do láhve. Odběrové nádoby (injekční stříkačky, vzorkovnice i láhve) je nutno pečlivě označit, je nutno vyplnit štítkové údaje o stroji, jeho stavu v době odběru, všech předchozích úpravách izolačního systému i o vlastním odběru. Přepravené nádoby se nesmí vystavovat účinkům slunečního záření, prudkým změnám teploty a je třeba je co nejrychleji dopravit do laboratoře. Zpracování vzorků se doporučuje provést do 5 dnů, stanovení vody co nejdříve, nejpozději do 3 dnů po odběru.

Metody pro komplexní rozbor vzorku izolačního oleje

- Barva kapalných izolačních olejů
- Hustota izolačního oleje
- Viskozita izolačního oleje
- Bod vzplanutí
- Obsah vody v oleji
- Číslo kyselosti
- Mezipovrchové napětí na rozhraní voda – kapalina
- Usazeniny a rozpustné kaly
- Elektrická pevnost izolačního oleje
- Vnitřní rezistivita
- Ztrátový činitel a relativní permitivita

Plynová chromatografie izolačního oleje

Tato metoda využívá fyzikálněchemických dějů, ke kterým dochází v důsledku negativních tepelných, elektrických či kombinovaných jevů při vzniku poruchových stavů v izolačním systému stroje, které se projevují tvorbou plynů, nazývaných rozkladové. K uvedeným typům závad může dojít kdykoliv a protože se jedná o nepřímou metodu, umožňující detekci vzniklých plynů, je úkolem posoudit prostřednictvím složení a množství plynů, závažnost na provozuschopnost.

Mezi sledované plyny patří zejména:

- N₂.....Dusík
- O₂.....Kyslík
- H₂.....Vodík
- CO₂.....Kysličník uhličitý
- CO.....Kysličník uhelnatý
- CH₄.....Metan
- C₂H₆.....Etan
- C₂H₄.....Etylén

4. Porovnání diagnostiky jednotlivých typů transformátorů VVN

Tato část práce se bude popisovat praktické profylaktické měření transformátorů VVN podle metodiky [4] a za pomoci výše uvedených metod bude provedena základní diagnostika stavu strojů a jejich vyhodnocení.

4.1 Odpojení z provozu a zajištění transformátoru

Pro bezpečné provedení diagnostiky transformátoru musí být stroj uvolněn z provozu a vypnut výkonovým spínačem ze strany VVN i Vn. Dále je provedeno vypnutí odpojovačů, případně vytažení vozíku vypínače na straně Vn a zajištění proti náhodnému zapnutí např. vypnutím jističe pohonu odpojovače nebo uzavřením kohoutu pro vzduchového ovládání. Zkoušečkou pro příslušná napětí se odzkouší beznapěťový stav a provede montáž zkratovacích souprav přímo u místa práce, tedy před průchodkami na víku nádoby transformátoru. Páskou se vymezí dané pracoviště a umístí výstražné tabulky. Vedoucí práce (osoba znalá s vyšší kvalifikací minimálně s paragrafem č.7 dle vyhlášky 50/78 sb.) převezme pracoviště od osoby, která provedla zajištění a tato osoba přesvědčí vedoucího práce o zajištěném pracovišti dotykem holé ruky na živé části zajištěného pracoviště. Poté se seznámí vedoucí práce se způsobem zajištění a částech rozvodny které zůstávají pod napětím a převezme Příkaz „B“ podpisem Seznámí své kolegy se zajištěním pracoviště, ti potvrzují svým podpisem seznámení s obsahem Příkazu „B“ a způsobem zajištění pracoviště.

4.2 Specifikace transformátorů

Pro praktické měření jsem vybral transformátory výrobců Škoda, ELIN a EBG. Jedná se o výkonové transformátory umístěné na hladině 110kV. Jsou vybaveny silovým přepínačem odboček na straně 110 kV a vinutí strojů je umístěno v olejové náplni, která plní funkce izolační i chladicí.

Výrobní číslo:	O929802	154 408	N 4935102
Typ:	9 ER 31 M - 0	DOR 56000/90E	DOR 56000 / 90 E
Zapojení:	Yn yn 0 / d	YN yn 0 / d	Yn yn 0 / d
Výkon:	25000 kVA	40000 kVA	40000 kVA
Převod napětí:	110 / 35 kV	110 / 35 kV	110 / 35 kV
Výrobce:	ŠKODA	ELIN	EBG
Rok výroby:	1998	1998	2002

Tab. 6. Specifikace transformátorů jednotlivých výrobců

4.3 Naměřené hodnoty činného odporu

Na silové průchodky transformátoru umístím měřicí kabely microohmetru Tettex 2292. Pro měření činného odporu se používá zapojení se čtyřmi vodiči, eliminuje se tím vliv přívodních vodičů a kontaktů. Proud z proudových svorek se zavádí jedním párem vodičů, úbytek napětí se měří druhým párem. Napěťové svorky umístím až za proudové svorky. Postupně provedu měření všech fází proti vyvedenému nulovému vodiči na straně VVn, poté Vn.

ODPOR VINUTÍ ŠKODA

VVn	R (mΩ)	Vn	R (mΩ)
L ₁ - N	659,23	l ₁ - n	52,7
L ₂ - N	665,36	l ₂ - n	52,8
L ₃ - N	669,92	l ₃ - n	53,4

ODPOR VINUTÍ ELIN

VVn	R (mΩ)	Vn	R (mΩ)
L ₁ - N	643,45	l ₁ - n	53,4
L ₂ - N	645,67	l ₂ - n	54,3
L ₃ - N	657,93	l ₃ - n	53,6

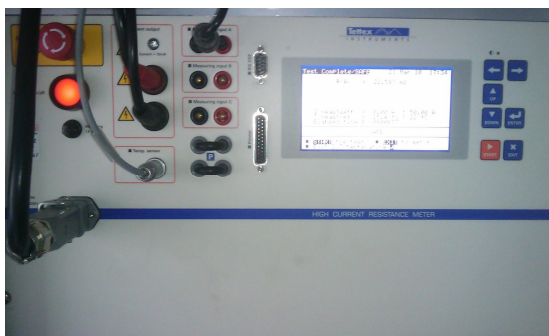
ODPOR VINUTÍ EBG

VVn	R (mΩ)	Vn	R (mΩ)
L ₁ - N	468,05	l ₁ - n	45,7
L ₂ - N	468,31	l ₂ - n	45,7
L ₃ - N	470,31	l ₃ - n	45,9

Tab. 7. Činný odpor vinutí

Microohmetr Tettex 2292

Rozsah: 0.1 μΩ .. 20 kΩ
Rozlišení: 0.1 μΩ
Přesnost: ± 0.05 % rdg ± 0.05 % full-scale
Výkon : 2.5 kW
Rozsah proudu: 0 .. 50 A
Testovací napětí: 50 VDC



Obr.9. Microohmetr 2292

Činný odpor [Ω] odchylka od referenční hodnoty			
hodnota	kritérium	hodnocení	opatření
< 2%	1	bez závad	žádné
2 - 5%	2	zhoršený stav	Plynová chromatografie, pouze nouzový provoz
> 5%	4	havarijní stav	Plynová chromatografie, neprovozovat
Kritéria platí pro 20°C			

Tab. 8. kriteria hodnocení činného odporu

4.4 Hodnoty převodů transformátoru a magnetizačních proudů

Provedu odpojení fází silové části transformátoru z průchodek Vn i VVn včetně vyvedeného vodiče N (zapojení transformátoru je YN yn 0) a zajistím proti dotyku na nádobu stroje nebo průchodku. Zapojím měřicí svorky převodoměru Tettex 2791 podle příslušné hladiny napětí a fází na silové průchodky. Pomocí ovládacích tlačítek silové regulace transformátoru na straně VVn navolím počáteční odbočku č.1 a provedu měření.

Přístroj automaticky zaznamená změřené hodnoty včetně magnetizačních proudů. Navolím odbočku č.2 a takto budu postupovat až po odbočku č.17. Silová regulace transformátoru je vybavena koncovými spínači na odbočce č.1 a č.17, nemůže tedy dojít v případě špatné volby ovládacího tlačítka k nežádoucímu poškození. Po úspěšném měření provedu demontáž kabelů.

ŠKODA							ELIN						EBG					
VVn	U - N		V - N		W - N		U - N		V - N		W - N		U - N		V - N		W - N	
Vn	u - n		v - n		w - n		u - n		v - n		w - n		u - n		v - n		w - n	
Odb	př.	I_m	př.	I_m	př.	I_m	př.	I_m	př.	I_m	př.	I_m	př.	I_m	př.	I_m	př.	I_m
1	3,49	4,6	3,49	3,8	3,49	4,6	3,49	4,6	3,49	3,8	3,49	4,6	3,47	5,9	2,47	5,4	3,47	5,0
2	3,43	4,7	3,42	3,7	3,42	4,6	3,43	4,7	3,42	3,7	3,42	4,6	3,41	5,1	3,41	5,6	3,41	5,1
3	3,36	4,8	3,36	3,7	3,36	4,5	3,36	4,8	3,36	3,7	3,36	4,5	3,35	6,1	3,35	5,8	3,35	6,0
4	3,30	4,8	3,30	3,7	3,30	4,6	3,30	4,8	3,30	3,7	3,30	4,6	3,29	6,8	3,29	5,9	3,29	5,8
5	3,24	5,0	3,24	3,9	3,24	4,7	3,24	5,0	3,24	3,9	3,24	4,7	3,23	6,5	3,23	7,2	3,23	6,9
6	3,18	5,1	3,17	4,0	3,18	4,8	3,18	5,1	3,17	4,0	3,18	4,8	3,17	7,7	3,17	6,8	3,17	6,6
7	3,11	5,1	3,11	4,1	3,11	4,8	3,11	5,1	3,11	4,1	3,11	4,8	3,11	7,1	3,11	6,3	3,11	6,7
8	3,05	5,0	3,05	4,2	3,05	5,1	3,05	5,0	3,05	4,2	3,05	5,1	3,05	8,0	3,05	7,2	3,05	6,3
9A																		
9B	2,99	5,0	2,99	4,2	2,99	5,1	2,99	5,0	2,99	4,2	2,99	5,1	2,99	6,7	2,99	6,7	2,99	6,5
9C																		
10	2,94	5,3	2,94	4,3	2,94	5,2	2,94	5,3	2,94	4,3	2,94	5,2	2,93	7,3	2,93	7,6	2,93	6,8
11	2,88	5,7	2,88	4,4	2,88	5,6	2,88	5,7	2,88	4,4	2,88	5,6	2,87	6,6	2,87	6,5	2,87	6,2
12	2,82	5,9	2,82	4,5	2,82	5,5	2,82	5,9	2,82	4,5	2,82	5,5	2,81	6,6	2,81	7,0	2,81	6,3
13	2,76	5,9	2,76	4,5	2,76	5,6	2,76	5,9	2,76	4,5	2,76	5,6	2,75	6,8	2,75	6,7	2,75	6,4
14	2,69	5,9	2,69	4,6	2,70	5,7	2,69	5,9	2,69	4,6	2,70	5,7	2,69	7,3	2,69	6,8	2,69	6,2
15	2,63	6,2	2,63	4,9	2,63	6,0	2,63	6,2	2,63	4,9	2,63	6,0	2,63	7,5	2,64	6,9	2,64	6,4
16	2,57	6,3	2,57	5,0	2,57	6,1	2,57	6,3	2,57	5,0	2,57	6,1	2,58	6,9	2,58	6,8	2,58	7,2
17	2,51	6,2	2,51	5,0	2,51	6,4	2,51	6,2	2,51	5,0	2,51	6,4	2,52	7,6	2,52	6,4	2,52	6,9

Tab. 9. Naměřené hodnoty převodů transformátorů

Pro vyhodnocení naměřených hodnot bude použita Tab. 10. V tomto případě naměřených hodnot nevznikla žádná anomálie, mohu tak tedy konstatovat, že silový přepínač odboček nemá přechodový odpor na žádné ze sedmnácti odboček.

Kontrola převodu [%] - odchylka od referenční hodnoty			
hodnota	kritérium	hodnocení	opatření
< 0,5%	1	bez závad	žádné
0,5-1%	2	zhoršený stav	Chromatografie, Diagnostika ve zkrácené lhůtě
> 1%	4	havarijní stav	Plynová chromatografie, neprovozovat

Tab. 10. kriteriia hodnocení převodu transformátorů

4.5 Ztrátový činitel $\tan \delta$ a kapacita

Pro měření ztrátového činitele musím provést propojení všech fází s vyvedeným nulovým vodičem na straně VVn, to samé provedu i na straně Vn. Silový vysokonapěťový kabel připojím na stranu VVn, snímací na stranu Vn. Pro měření ztrátového činitele proti zemi připojím svorku na nádobu stroje v místě uzemnění (měřící svorku musím připojit před izolační podložky pro kostrovou ochranu). Kombinace jednotlivých zapojení je popsána v kapitole 3.6 - Měření ztrátového činitele a kapacity, časová konstanta.

ZTRÁTOVÝ ČINITEL $\tan \delta$ A KAPACITA transformátoru ŠKODA

zapojení	$\tan \delta$	$\tan \delta$ [%]	$\tan \delta$ 20°C [%]	C [nF]	Měř. U [kV]
VVn - Vn	0,0031	0,31	0,2604	5,337 nF	10
VVn - Vn+k	0,0039	0,39	0,3276	8,399 nF	10
VVn - k	0,0052	0,52	0,4368	3,062 nF	10

ZTRÁTOVÝ ČINITEL $\tan \delta$ A KAPACITA KAPACITA transformátoru ELIN

zapojení	$\tan \delta$	$\tan \delta$ [%]	$\tan \delta$ 20°C [%]	C [nF]	Měř. U [kV]
VVn - Vn	0,0031	0,31	0,2604	5,337 nF	10
VVn - Vn+k	0,0039	0,39	0,3276	8,399 nF	10
VVn - k	0,0052	0,52	0,4368	3,062 nF	10

ZTRÁTOVÝ ČINITEL $\tan \delta$ A KAPACITA transformátoru EBG

zapojení	$\tan \delta$	$\tan \delta$ [%]	$\tan \delta$ 20°C [%]	C [nF]	Měř. U [kV]
VVn - Vn	0,0021	0,21	0,2100	9.729	10
VVn - Vn+k	0,0025	0,25	0,2500	13.27	10
VVn - k	0,0034	0,34	0,3400	3.538	10

Tab. 11. kriteria hodnocení ztrátového činitele $\tan \delta$

Zařízení MIDAS 2881G používá pro diagnostiku touto metodou vysoké napětí 10 kV DC, musí se proto dbát na přísnou bezpečnost práce.

Také v tomto případě transformátory vyhověly kritériím v Tab. 11. Ze změřených hodnot vyplývá výborný stav strojů.

Ztrátový činitel - $\tan \delta$ [%]			
hodnota	kritérium	hodnocení	opatření
< 2,5%	1	bez závad	žádné
2,5 - 5%	2	zhoršený stav	pokud kritérium $R_i < 1$ = Diag. ve zkrácené lhůtě, Chrom.
> 5%	4	havarijní stav	pokud kritérium $R_i > 1$ = neprovozovat, filtrovat, Chrom.
Kritéria platí pro 20°C			

Tab. 12. kriteria hodnocení ztrátového činitele $\tan \delta$

4.6 Izolační stavy transformátorů

Diagnostiku izolačního stavu transformátoru změřím pomocí přístroje Teraohmmetr Tettex 5478. Měřicí napětí zvolím 2,5 kV a postupně přepojuji svorky mezi vinutím VVn, Vn a kostrou transformátoru. Přístroj dokáže vypočítat polarizační index při měřicích časech $t = 15s$ a $t = 60s$.

IZOLAČNÍ ODPOR ŠKODA

zapojení	t=15s M Ω	t=60s M Ω	pi	U (kV)
VVn - k	91500	147000	1,61	2,5
VVn-Vn	112000	175000	1,56	2,5
Vn - k	87900	150000	1,71	2,5

IZOLAČNÍ ODPOR ELIN

zapojení	t=15s M Ω	t=60s M Ω	pi	U (kV)
VVn - k	13200	40600	3,076	2,5
VVn-Vn	24800	35800	1,444	2,5
Vn - k	18000	27600	1,533	2,5

IZOLAČNÍ ODPOR EBG

zapojení	t=15s M Ω	t=60s M Ω	pi	U (kV)
VVn - k	33200	60300	1,82	2,5
VVn-Vn	28100	50500	1,80	2,5
Vn - k	19200	30600	1,59	2,5

Tab. 13. Změřené hodnoty izolačních stavů transformátoru

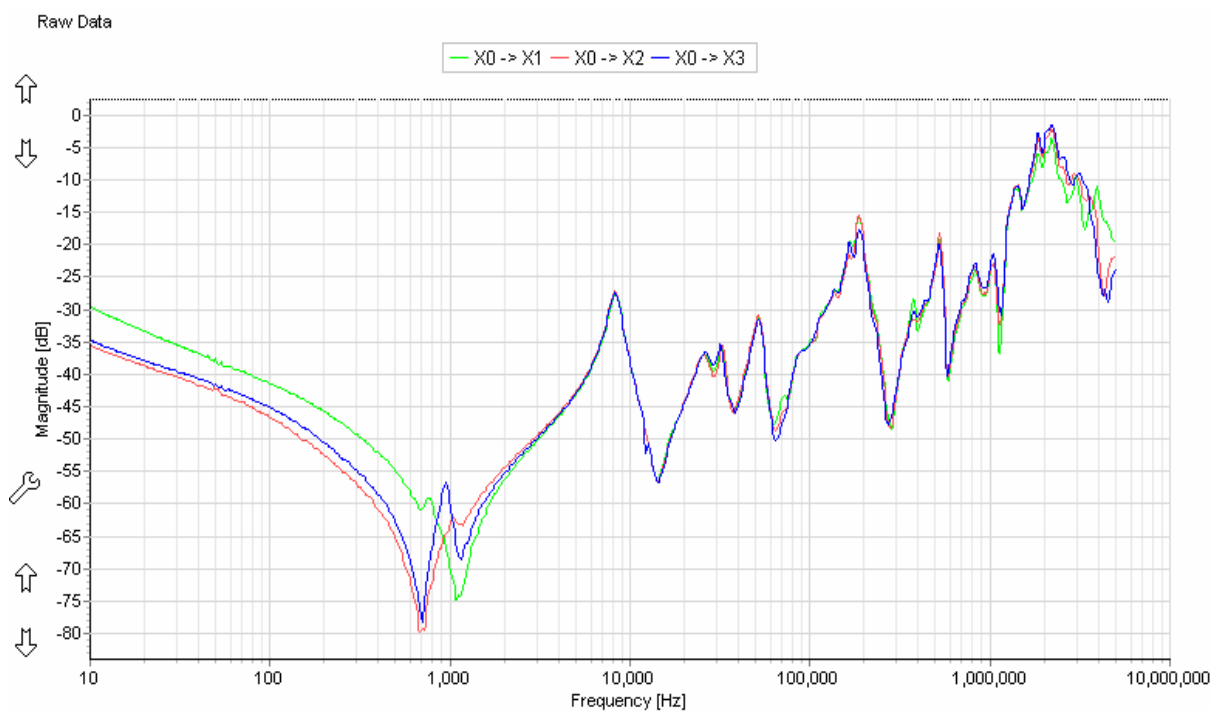
Z naměřených hodnot v Tab. 13. dobrý izolační stav strojů s polarizačním indexem vyšším jak hodnota 1 a korespondujícím s diagnostickou metodou měření ztrátového činitele $\tan \delta$.

Izolační odpor R 60 [M Ω]			
hodnota	kritérium	hodnocení	opatření
>1000	1	bez závad	žádné
1000 - 750	2	zhoršený stav	kritérium $\tan \delta$ (%) >1 = Diag. ve zkrácené lhůtě, Chrom.
< 750	4	havarijní stav	kritérium $\tan \delta$ (%) >1 = neprovozovat, filtrovat, Chrom.
Kritéria platí pro 20°C			

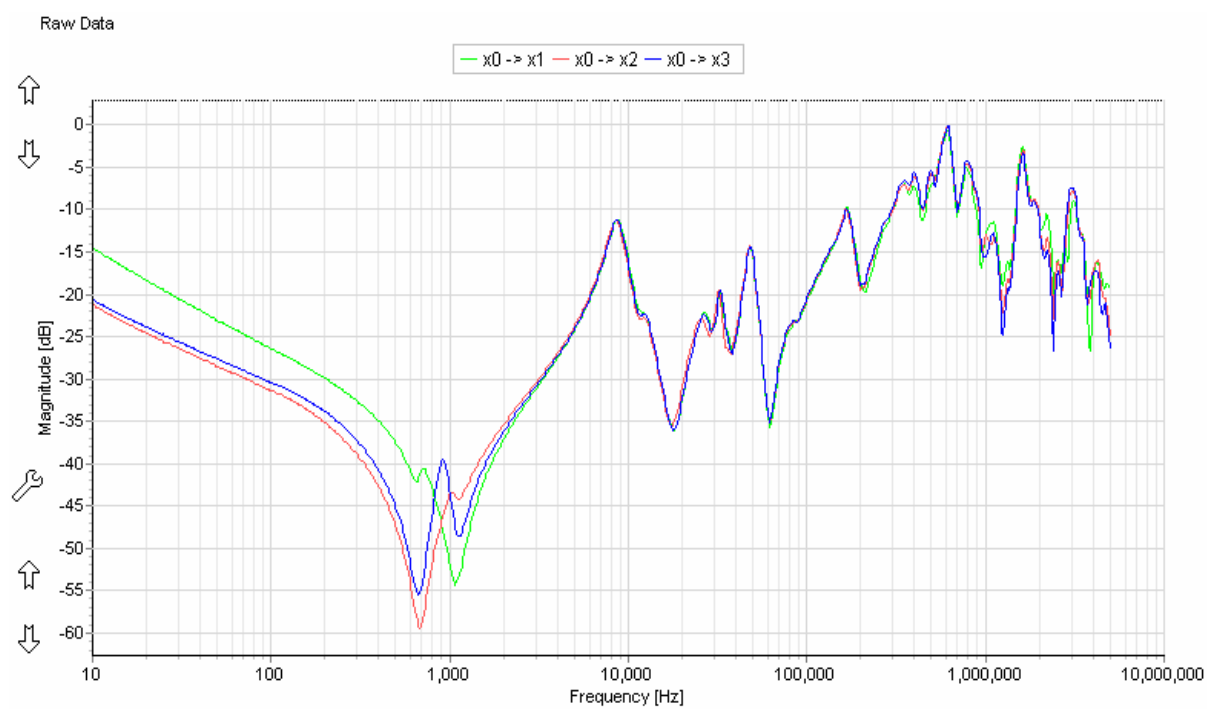
Tab.14. kriteria hodnocení izolačních stavů

4.7 Frekvenční analýza

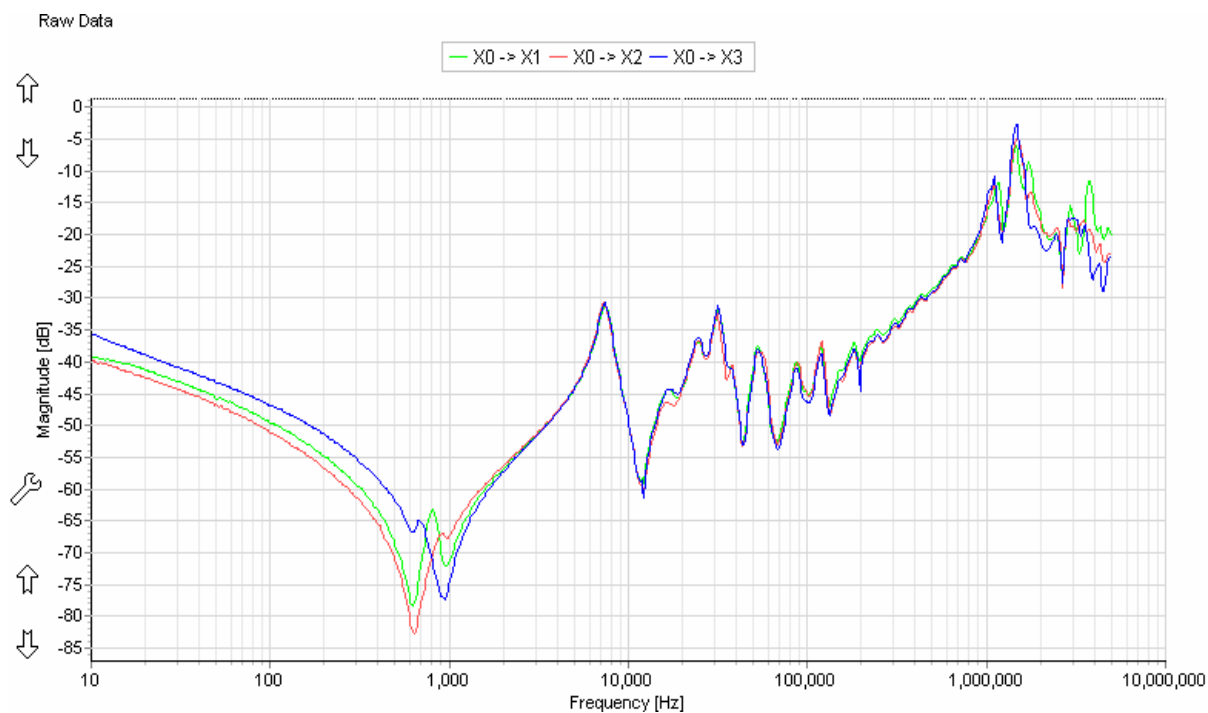
Přístrojem FRA Tettex 5310 vyhodnotím porovnáváním grafů zda nedošlo ke změně nebo posunu vnitřních částí transformátorů vlivem velkého proudového namáhání nebo zkratů. Tyto grafy by se měli v ideálním případě lišit minimálně.



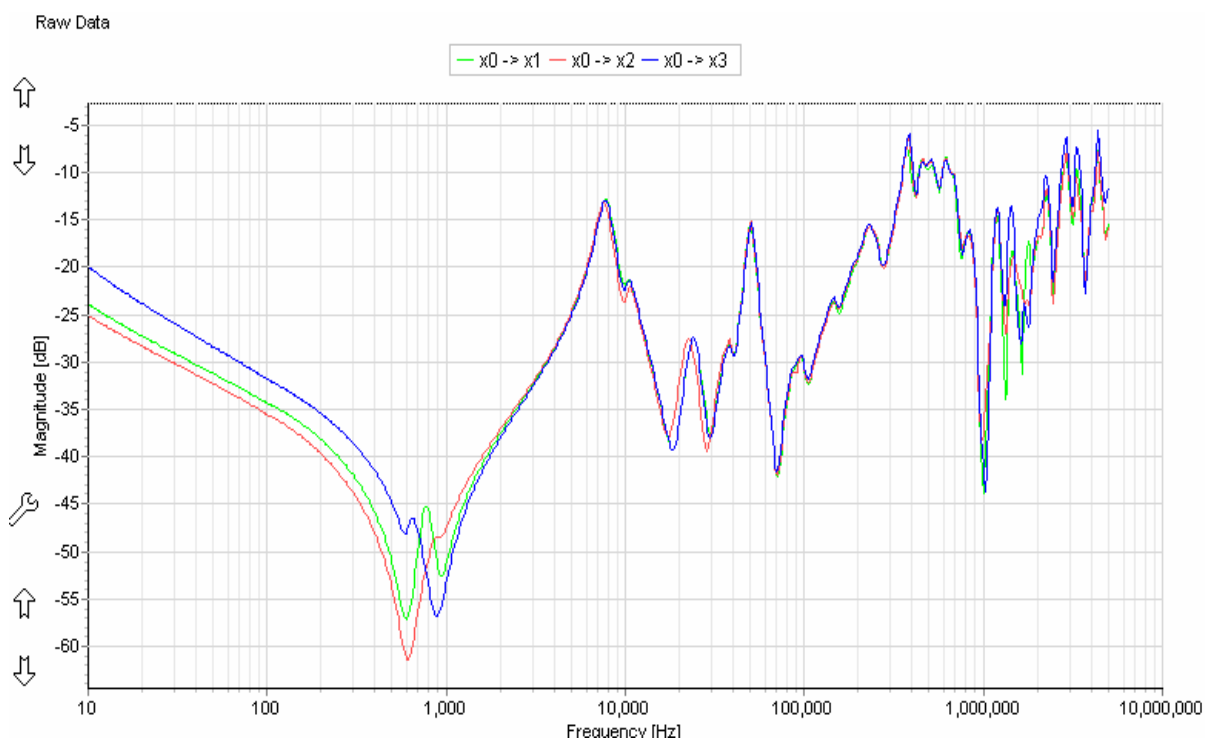
Obr. 9. Frekvenční charakteristika vinutí VVn transformátoru ELIN



Obr. 10. Frekvenční charakteristika vinutí Vn transformátoru ELIN



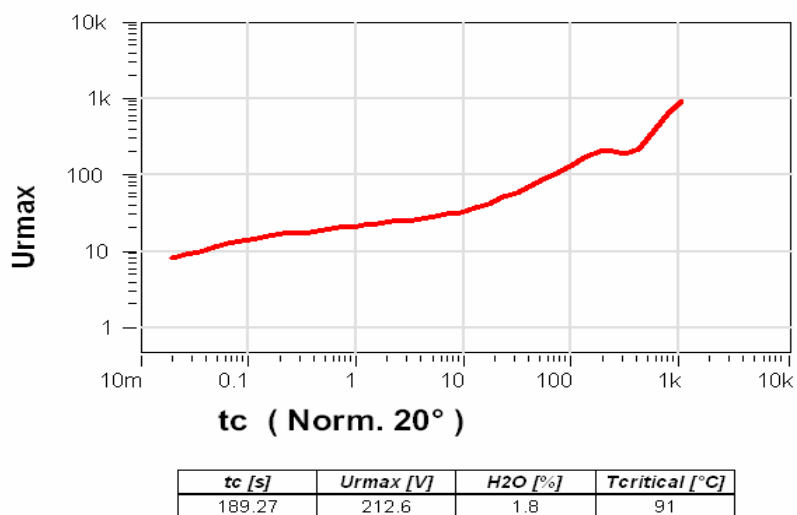
Obr. 11. Frekvenční charakteristika vinutí VVn transformátoru ŠKODA



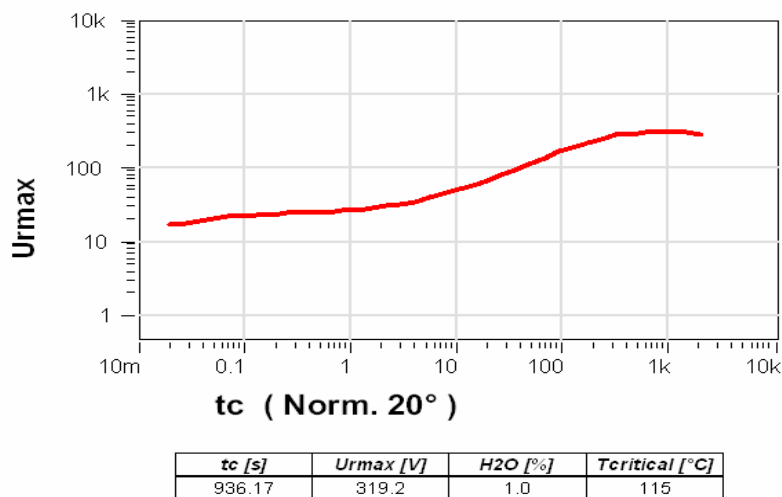
Obr. 12. Frekvenční charakteristika vinutí Vn transformátoru ŠKODA

4.8 Diagnostika pevného dielektrika

Voda obsažená v olejové náplni transformátoru má neblahý vliv působením na papírovou izolaci vinutí stroje. Způsobuje chemické reakce a degradaci papírové izolace. Pomocí přístroje RVM Tettex 5462 budu zjišťovat procentní obsah vody v izolaci a kritickou teplotu pro začátek tvorby vzduchových bublin, které by zapříčinily případné působení plynového (Bucholzova) relé.



Obr. 13. Analýza vody ve vinutí transformátoru ELIN



Obr. 14. Analýza vody ve vinutí transformátoru ŠKODA

Jako kritérium pro vyhodnocení diagnostiky pevného dielektrika jsem použil *Tab. 15*. Z hodnot obsažených v této tabulce lze usuzovat, že míra navlhnutí papírové izolace je nízká a kritická teplota má vysokou hodnotu, což odpovídá dobrým fyzickým stavům měřených transformátorů.

Obsah vody [%]			
hodnota	kritérium	hodnocení	opatření
< 2%	1	bez závad	žádné
2-5%	2	zhoršený stav	Chromatografie, Diagnostika ve zkrácené lhůtě
> 5%	4	havarijní stav	Plynová chromatografie, neprovozovat

Tab. 15. kriteria hodnocení obsahu vody v papírové izolaci

4.9 Použité měřicí přístroje [6]

Převodoměr Tettex 2791

Budící napětí: 1 V, 10 V, 40 V and 100 V; automatický nebo manuální výběr
Budící proud: max. 1 A (10 mA na 1 V)

Automatický měřicí systém Tettex MIDAS 2881G

Měřicí jednotka	Rozsah	Rozlišení	Přesnost
Ztrátový činitel $\tan \delta$	0 .. 100	0.0001	$\pm 0.5 \% \text{ rdg} \pm 0.0001$
	(0 .. 10'000%)	(0.01%)	($\pm 0.5 \% \text{ rdg} \pm 0.01\%$)
Účinník $\cos \varphi$	0 .. 1	0.0001	$\pm 0.5 \% \text{ rdg} \pm 0.0001$
	(0 .. 100%)	(0.01%)	($\pm 0.5 \% \text{ rdg} \pm 0.01\%$)
Činitel jakosti	0.01 .. 10000	0.0001	$\pm 0.5 \% \text{ rdg} \pm 0.0001$
Rozsah kapacitní reaktance při 50Hz	6.5 pF .. 56 nF @ 15kV	0.01 pF	$\pm 0.3 \% \text{ rdg} \pm 0.3 \text{ pF}$
	8.1 pF .. 88 nF @ 12kV		
	1.2 nF .. 13 uF @ 80V		
Rozsah indukčního odporu při 50Hz	140 H .. 1600 kH @ 15kV	0.1 mH	$\pm 0.5 \% \text{ rdg} \pm 0.5 \text{ mH}$
	112 H .. 1280 kH @ 12kV		
	0.75 H .. 8.5 kH @ 80V		
Zkušební napětí	$\leq 15 \text{ kV}$ (12 kV)	1 V	$\pm 0.3 \% \text{ rdg} \pm 1 \text{ V}$ 2
Testovací proudový výstup A & B	30uA .. 15 A	0,1 uA	$\pm 0.3 \% \text{ rdg} \pm 1 \text{ uA}$
Testovací frekvence	15 .. 400 Hz	0.01 Hz	$\pm 0.1 \% \text{ rdg} \pm 0.1 \text{ Hz}$

Microohmetr Tettex 2292

Rozsah: 0.1 $\mu\Omega$.. 20 k Ω
Rozlišení: 0.1 $\mu\Omega$
Přesnost: $\pm 0.05 \% \text{ rdg} \pm 0.05 \% \text{ full-scale}$
Výkon: 2.5 kW
Rozsah proudu: 0 .. 50 A
Testovací napětí: 50 VDC

Teraohmetr Tettex 5478

Rozsah měření odporu :	0.01 M Ω ...5 T Ω	$\pm 5 \% \text{ rdg} \pm 3 \text{ dig.}$
Rozsah kapacitní reaktance :	0... 50 μF	$\pm 5 \% \text{ rdg} \pm 2 \text{ dig.}$
Svodový proud :	0... 1.4 mA	$\pm 3 \% \text{ rdg} \pm 3 \text{ dig.}$
Zkušební rozsah napětí:	0... 5500 V	$\pm 3 \% \text{ rdg} \pm 40 \text{ V}$
Rozsah napětí AC/DC :	0... 600 V	$\pm 3 \% \text{ rdg} \pm 3 \text{ V}$
Frekvenční rozsah:	45... 65 Hz	$\pm 0.2 \text{ Hz}$
Polarizační index:	0... 99.9	$\pm 5 \% \text{ rdg} \pm 2 \text{ dig.}$
Testovací napětí:	250 V... 5000 V	$\pm 3 \% \text{ rdg} \pm 3 \text{ V}$

FRA Tettex 5310

Frekvenční rozsah:	10 Hz .. 10 MHz, možnost volby
Výstupní napětí:	max. 12 V _{peak} - peak na 50 W, max. 24 V _{peak} -peak na 1 MW
Vstupní impedance:	volitelná 50 W nebo 1 MW
Výstupní impedance:	50 W
Přesnost:	± 0.1 dB , zero calibrated
Dynamický rozsah:	>100 dB
Měřicí body:	max. 2000

RVM Tettex 5462

Rozsah měření:	50...2000 V DC
Proudová zátížitelnost (stálá):	5 mA
Max. zkratový proud:	200 mA, 100 ms
Rozsah nabíjení a vybíjení t_C , t_D	10 ms... 99 999 s
Rozsah měření odporu:	1 M Ω ... 1000 G Ω

4.10 Srovnání metod a jejich použitelnost

Diagnostika izolačních částí

Životnost transformátoru je limitována především životností papírové izolace vinutí, jejíž mechanická pevnost se postupně zmenšuje. Životnost papírové izolace je obvykle podstatně kratší než životnost ostatních konstrukčních prvků. Zde můžeme použít metody pro měření kapacity a ztrátového činitele $\tan \delta$ na izolačních systémech elektrických prvků, dále měření izolačního odporu, který patří mezi nejstarší diagnostické metody v profylaktice výkonových transformátoru. Do této kategorie můžeme zahrnout i diagnostiku pevného dielektrika pro spolehlivé určení vlhkosti papírové izolace transformátorů, která má velký vliv na degradaci papírové izolace a tedy i životnost celého transformátoru.

Diagnostika vinutí transformátoru

Jedním ze základních elektrických měření na transformátorech je měření převodu vinutí a jeho polarity a magnetizačních proudů. Jako další metoda určující stav vinutí je metoda měření činného odporu vinutí, která umožňuje nejen zjištění odporu konkrétního vinutí, ale i zkratu, rozpojení vinutí, závitových zkratů nebo problémů spojených s přepínačem odboček.

Diagnostika mechanických změn v transformátoru

Metoda pomocí frekvenční analýzy umožňuje detekci odchylek v mechanickém uspořádání transformátoru. V případě porovnání s referenčním měřením je možno s téměř 100% jistotou potvrdit nebo vyloučit změny v zapojení a poloze jednotlivých částí např. při transportu stroje z výrobního závodu, při rekonstrukcích stání transformátoru, nebo v provozu po zkratovém namáhání.

Diagnostika olejové náplně transformátoru

Disproporce mezi životností papírové izolace a ostatních konstrukčních částí se značně zvětšuje, není-li ošetřována olejová náplň transformátoru. Mezi stárnutím oleje a papíru totiž existuje vzájemná závislost: produkty rozkladu oleje jsou absorbovány papírem a naopak, což urychluje proces jejich stárnutí. Jestliže není zestárlá olejová náplň před ukončením své životnosti vyměněna, popř. zregenerována, urychluje se nevratná degradace papírové izolace, a tedy rychleji nastává následná havárie transformátoru. Provozovatel transformátoru může během jeho provozu přímo zabezpečovat údržbu v podstatě pouze olejové náplně. Přitom však životnost olejové náplně je asi

dvakrát až třikrát kratší než životnost papíru (pokud nenastane jeho urychlená degradace vlivem ukončené životnosti olejové náplně). Proto je nutné znát stav olejové náplně a na základě znalosti jejího stavu vykonávat efektivní údržbu, která zahrnuje zejména její sušení a výměnu, popř. regeneraci těsně před ukončením její životnosti. V případě zanedbání údržby se zkrátí životnost transformátoru. Nehledě na ekonomickou ztrátu při předčasném ukončení doby života transformátoru je třeba brát v úvahu hledisko ekologie v případě havárie.

5. Zhodnocení a závěr

V této práci jsem popsal jednotlivé postupy a měření pro diagnostiku výkonových transformátorů VVn. Pro praktickou část jsem vybral transformátory od tří výrobců - Škoda, ELIN a ETD. Provedl jsem měření na uvedených transformátorech při dodržení bezpečnosti práce na zařízeních VVn a vydání příkazu „B“. Získal jsem informace o jednotlivých transformátorech ze štítků výrobců, jejich zapojení, jmenovitém napětí, proudech vinutí a výkonů. Tyto hodnoty jsem použil pro nastavení měřicích přístrojů. Získané hodnoty jsem zaznamenal do tabulek pro jednotlivé metody, abych získal přehled o stavu transformátorů, jejich silových vinutích, stavu magnetického obvodu a izolačních stavech vinutí včetně navlhnutí papírové izolace. Z naměřených hodnot vyplývá velmi dobrý stav strojů, kdy ztrátový činitel $tg \delta$ nepřesahuje 0,5% při korekci teploty na 20 °C u všech možností zapojení, což odpovídá hodnotám nových transformátorů. Mohu konstatovat, že silové přepínače odboček nevykazují poruchu nebo přechodový odpor, protože jednotlivé odbočky plynule mění hodnotu převodu včetně magnetizačního proudu. Izolační stavy transformátorů vyhovují včetně polarizačních indexů. Navlhnutí papírové izolace je do 2% obsahu olejové náplně. Pomocí metody frekvenční analýzy jsem porovnáním nezjistil žádný posun jádra nebo deformaci silových cívek VVn i Vn včetně průchodek. Činné odpory vinutí cívek transformátorů korespondují s hodnotami sousedních fází. Těmito metodami jsem ověřil provozuschopnost zařízení a jejich spolehlivost do další periodické diagnostiky transformátorů.

6. Literatura

- [1] Václav Mentlík, Josef Pihera, Radek Polanský, Pavel Prosr, Pavel Trnka
Diagnostika elektrických zařízení
© Nakladatelství BEN - technická literatura, Praha 2008
- [2] Alexandr Barták, Luděk Mravinač, Jacek Neumann, Jan Vařák
Diagnostika poruch izolací elektrických strojů
© Vydalo SNTL, Praha 1984
- [3] Rudolf Bouda, Jan Dubský, Josef Chmelík
Technologie elektrických strojů netočivých
© Vydalo SNTL, Praha 1958
- [4] ČDS_PP_0024_r01
Diagnostika elektrických zařízení vn a vvn - transformátory
© ČEZ Distribuční služby, s.r.o., zpracovatel Antonín Jungwirth, 2009
- [5] URL <<http://www.tmvss.cz/index.html>>[citováno 2009-13-12]
<<http://www.tmvss.cz/index.html>>
Dostupné z <http://www.tmvss.cz/index.html>
- [6] URL <<http://www.haefely.com>>[citováno 2009-13-12]
<<http://www.haefely.com>>
Dostupné z <http://www.haefely.com>
- [7] URL <<http://www.eldiag.cz/texty/dga.html>>[citováno 2008-10-06]
<<http://www.eldiag.cz/texty/dga.html>>
Dostupné z <http://www.eldiag.cz/texty/dga.html>
- [8] URL <http://www.orgrez.cz/?section=divize_labor#diagez>[citováno 2009-13-12]
<http://www.orgrez.cz/?section=divize_labor#diagez>
Dostupné z http://www.orgrez.cz/?section=divize_labor#diagez
- [9] URL <<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/17.pdf>>
[citováno 2007-06-28]
<<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/17.pdf>>
Dostupné z <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/17.pdf>
- [10] URL <<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/20.pdf>>
[citováno 2007-06-28]
<<http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/20.pdf>>
Dostupné z <http://ketsrv.fel.zcu.cz/diagnostika/konference/Sbornik/Sekce2/20.pdf>